



УДК 621.313.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЯ ДВУХСЕКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФОРМЫ РАЗВЕРТЫВАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ШИМ

### INVESTIGATION OF THE HARMONIC BALANCE OF THE VOLTAGE OF A TWO-SECTION FREQUENCY CONVERTER UNDER DIFFERENT SHAPE OF THE PWM SWEEP VOLTAGE

**Грязнов Артём Андреевич**, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: argryaznov@ya.ru.

**Костылев Алексей Васильевич**, к.т.н. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru.

**Artem A. Gryaznov**, Master student, Department «Electric drive and automation of industrial installations», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: argryaznov@ya.ru.

**Aleksey V. Kostilev**, Candidate of Technical Sciences., Prof., Department « Electric drive and automation of industrial installations », Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru.

**Аннотация:** В предложенной статье рассмотрены вопросы анализа работы двухсекционного преобразователя частоты (ДСПЧ), собранного на базе двух последовательно включенных инверторов напряжения. Также рассматривается вопрос реализации синусоидальной широтно-импульсной модуляции для предложенного преобразователя. Представлены характеристики выходного напряжения при различной форме сигнала развертывающего напряжения ШИМ.

**Abstract:** In the proposed article, the analysis of the operation of a two-section frequency converter (DSPCH) assembled on the basis of two series-connected voltage source inverters is considered. The implementation of sinusoidal pulse width modulation for the proposed converter is also considered. The characteristics of the output voltage are presented for different waveforms of the PWM sweep voltage.

**Ключевые слова:** двухсекционный преобразователь частоты; синусоидальная широтно-импульсная модуляция.

**Key words:** two-section frequency converter; sinusoidal pulse width modulation.

В современной полупроводниковой преобразовательной технике для регулируемого электропривода переменного тока получили применение многоуровневые и, в частности, трехуровневые автономные инверторы, позволяющие увеличить число уровней выходного напряжения и улучшить гармонический состав переменного тока, питающего двигатель [2, 5]. Однако существуют недостатки силовых схем с трехуровневыми автономными инверторами такие, как наличие дополнительных фиксирующих диодов и проблема поддержания заданного значения нулевого уровня напряжения питания.

В работе [3] рассмотрен представленный на рис.1. альтернативный вариант силовой схемы – двухсекционный преобразователь частоты (ДСПЧ), состоящий из двух двухуровневых инверторов напряжения (UZ1, UZ2), выполненных по трехфазным мостовым схемам и имеющих независимое питание от двух потенциально разделенных источников выпрямленного напряжения ( $E_{d1}$ ,  $E_{d2}$ ). По сравнению с классической схемой трехуровневого инвертора предложенная схема дает аналогичное увеличение выходной мощности, величины и числа возможных уровней выходного напряжения. При этом снимается проблема распределения напряжения между конденсаторами в цепях

питания инверторов, а также между последовательно соединенными силовыми транзисторами в классической схеме. Вместе с тем, в предлагаемой схеме отсутствуют дополнительные фиксирующие диоды и становится проще улучшить сетевые характеристики преобразователя частоты, используя возможности многопульсных схем выпрямления.

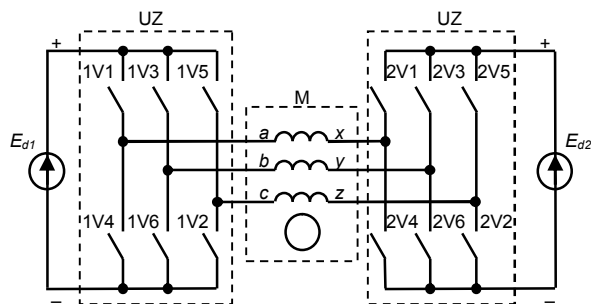


Рис.1.Силовая схема двухсекционного инвертора напряжения

По форме и гармоническому составу выходное фазное напряжение преобразователя также близко к напряжению трехуровневого преобразователя. При этом, как показано в [3], наиболее благоприятные результаты по улучшению качества выходного напряжения могут быть достигнуты путем замены симметричных сигналов развертки ШИМ на несимметричные, и введения относительного сдвига этих сигналов во времени на полпериода их следования. В работе [4] указано, что при этом обеспечивается реализация среднего вектора напряжения на периоде модуляции с помощью ближайших базовых векторов преобразователя. Это позволяет минимизировать при переключении величину  $dU/dt$  выходного напряжения преобразователя.

Однако использование несимметричного развертывающего сигнала ШИМ в цифровых системах управления с периодом квантования кратным периоду модуляции приводит к появлению низкочастотных гармоник в спектре выходного напряжения преобразователя [3]. Эффект особенно проявляется при относительно низких частотах ШИМ – 1-2 кГц.

Причина эффекта заключена в искажениях сигнала управления, квантованного по времени. Рассмотрим влияние этого эффекта на гармонический состав выходного напряжения традиционного двухуровневого инвертора. При этом будем варьировать форму сигнала развертки, последовательно изменяя ее от симметричной к несимметричной односторонней.

В качестве показателя степени несимметрии сигнала развертки введем коэффициент:

$$K_n = |T_1 - T_2|/T_{\text{ШИМ}} \quad (1).$$

Выражение поясняет рис.2.

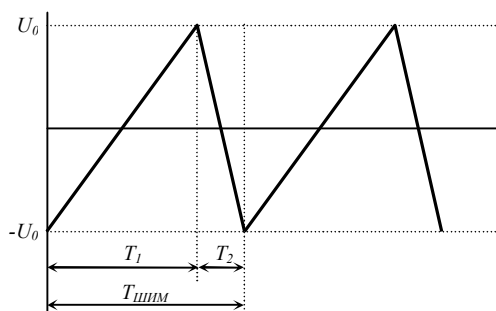


Рис.2.Несимметричный сигнал развертывающего напряжения ШИМ

Расчет показывает, что с увеличением коэффициента несимметрии  $K_n$  линейно возрастает значение амплитуды второй гармоники выходного фазного напряжения  $U_{\phi(2)}$  (рис.3а). При этом полный коэффициент гармонических искажений (Total Harmonic Distortion - THD) практически неизменен.

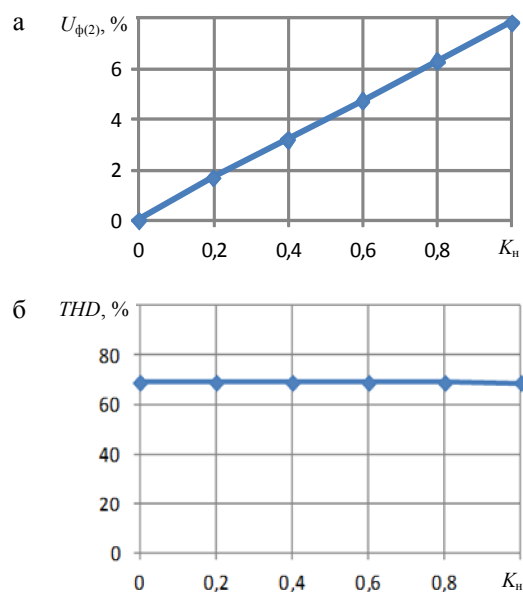


Рис.3. Параметры выходного напряжения двухуровневого инвертора при изменении формы развертывающего напряжения

Расчеты выполнены при  $f_{\text{ШИМ}}/f_3=20$  (где  $f_{\text{ШИМ}}$  – частота ШИМ,  $f_3$  – заданная частота) и амплитуде заданного напряжения  $U_3=U_0$ .

Следует отметить, что наличие низкочастотной гармоники является значительным негативным фактором, поскольку в токе двигателя ее относительное значение существенно возрастает. Для устранения этого фактора в [3] был предложен алгоритм компенсации 2-й гармоники в сигнале задания. К сожалению, его применение

связано с серьезным усложнением общего алгоритма управления преобразователем.

Рассмотрим изменения параметров выходного фазного напряжения при изменении формы напряжения развертки для двухсекционного преобразователя. Результаты расчетов приведены на рис.4.

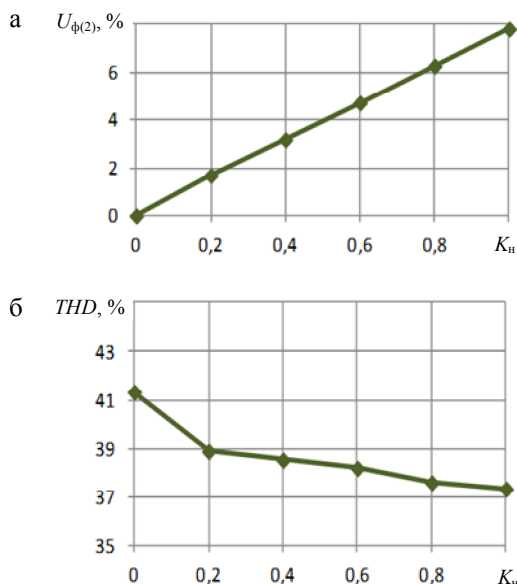


Рис.4. Параметры выходного напряжения двухсекционного инвертора при изменении формы развертывающего напряжения

Как видно на рис.3 и рис.4, значение амплитуды второй гармоники подчинено тому же закону, что и для традиционного преобразователя. При этом полный коэффициент гармонических искажений в двухсекционном преобразователе имеет существенно меньшие значения и меняется более ощутимо в зависимости от коэффициента несимметричности развертывающего напряжения.

Крайние варианты для  $K_n$  приведены на рис.5 и рис.6 соответственно. На рис.5. (симметричная развертка). В этом случае 2-я гармоника полностью отсутствует, но нарушается правило реализации желаемого вектора с помощью ближайших базовых. Это проявляется в провалах выходного напряжения до нуля и, как следствие, увеличении,  $dU/dt$ .

На рис.6. (полностью несимметричная развертка) 2-я гармоника имеет максимальное значение 7,85% от 1-й, но при этом THD ощутимо меньше, а также меньше и значение  $dU/dt$ . Из вышесказанного следует, что при необходимости обеспечения максимальных показателей совместимости с электрической машиной, что требуется, обычно, для двигателей большой мощности, целесообразен вариант с полностью несимметричным развертывающим напряжением.

При этом следует вводить в алгоритм управления преобразователем блок компенсации 2-й гармоники.

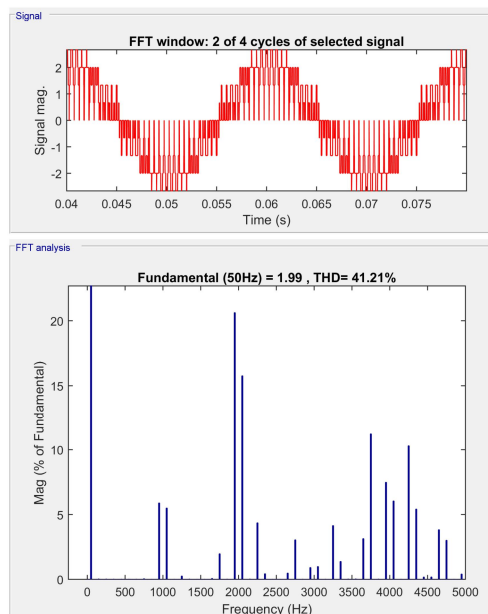


Рис.5. Гармонический состав выходного напряжения двухсекционного ПЧ при  $K_n=0$

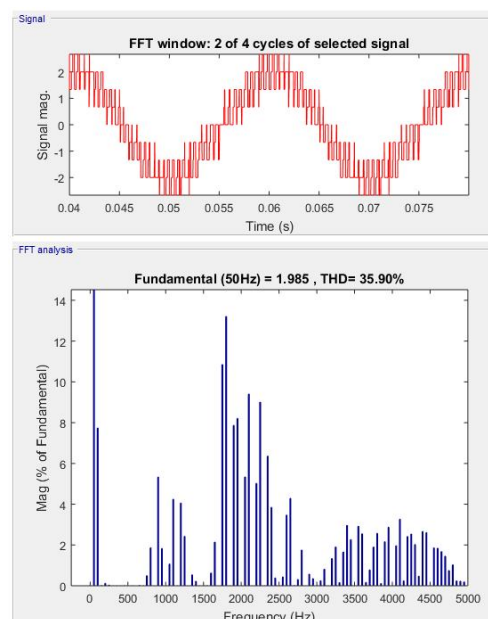


Рис.6. Гармонический состав выходного напряжения двухсекционного ПЧ при  $K_n=1$

В случае, если высокая совместимость с двигателем не требуется, допустимо применение симметричного развертывающего напряжения или напряжения с коэффициентом несимметрии  $K_n=0,1-0,2$ . В этом случае 2-й гармоникой можно пренебречь и, соответственно, упростить алгоритм управления преобразователем. Заметим, что при частотах модуляции 4-5 кГц в этом случае 2-я гармоника выходного напряжения исчезающе мала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костылев А.В. Реализация векторной ШИМ в двухсекционном преобразователе частоты. Электротехника, 2016, № 10, С.62-67
2. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов. Под ред. Крутякова Е.А. Санкт-Петербург, «Электросила», 2003. 172 с.
3. Шрейнер Р.Т. Электропривод переменного тока с двухсекционным инвертором напряжения / Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И. // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, ИЭГУ, 2012, С. 345-350
4. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И. Векторная ШИМ для двухсекционного преобразователя частоты (статья) Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Челябинск: 2015. – Том 15. – №2. С.34-40.
5. Pou J. Modulation and control of three-phase PWM multilevel converters. Ph. D. Dissertation. Terrassa, Universitat politècnica de Catalunya, 2002, 206 p.